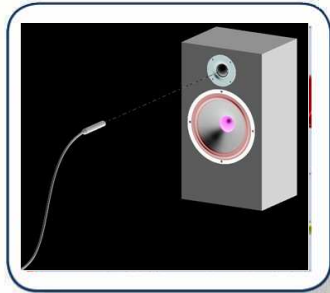


# FINE X-over™



## 分音器设计 指导书

**LOUDSOFT**  
[www.loudsoft.com](http://www.loudsoft.com)

注意：如果将 **PDF READER** 的“平滑文本”选项去掉，将会解决显示汉字太淡的问题。

我们将介绍几个用 FINE X-over 设计的分音器实例（普通的和高级的）。

我们先建立一个连接两个喇叭的分音器。这两个喇叭事先已装在音箱里，并测量完毕。点 New 调出 FINE X-over 助手，它会指导你设计最好的分音器。

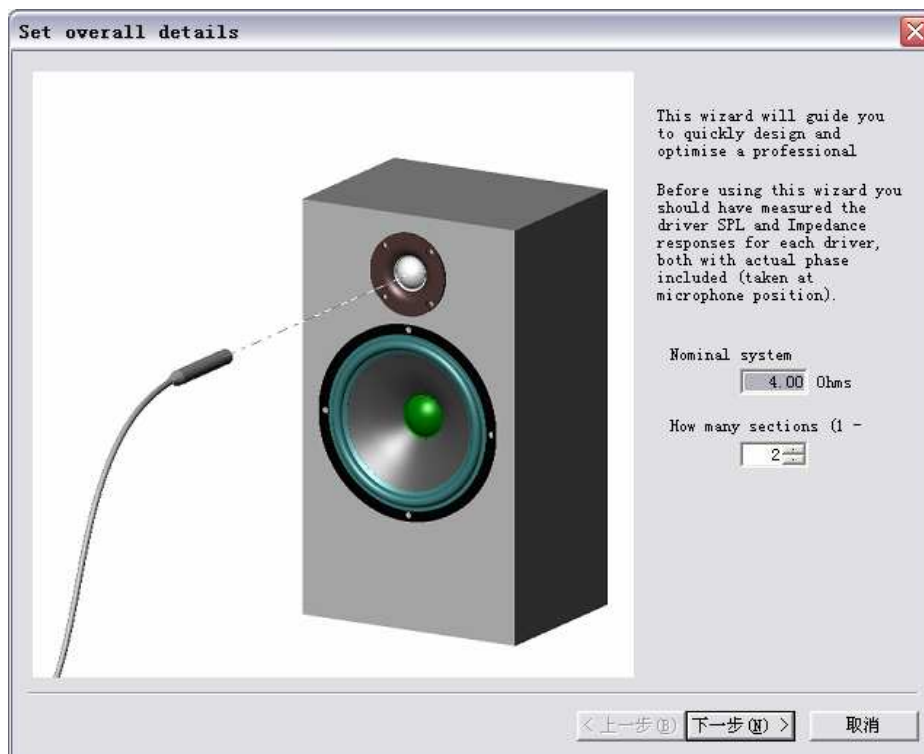


图 1. 启动 FINE X-over 助手

我们可以输入很多测试系统的数据文件，比如：MLSSA，LMS，CALSOD，Sound-check 等等。现在我们用 MLSSA 的 \*.FRQ 和 \*.TXT 文件。

正如图 1 所示，这两个喇叭是在音箱中测试的。我们把麦克风放置在试听的位置(通常是对准高音)，并且在适当的距离(一般是 2-3 米)。然后，我们测试低音，并且按照\*.txt 格式输出(Actual + BODE Plot in MLSSA)；保持麦克风不动，再测高音。最后，我们在 20-20KHz 测试两个喇叭的阻抗。

选择 Nominal system impedance(系统公称阻抗)，一般是 4 或 8 欧姆(通常看低音而定)。即使 1 欧姆或者 0.5 欧姆都可以。这被用在最初的分音器计算和最小阻抗计算上。我们将设置公称阻抗为 4 欧姆(因此最小阻抗为  $4 \text{ ohms} - 20\% = 3.2 \text{ ohms}$ )。因为有两个喇叭，所以图 1 中的“**How many sections[1-6]**”处，我们选择 2 个音路。

点“下一步”。出现图 3。点“Open SPL”来读取先前测好的频响曲线：SKO130-SPL.txt. 然后点“Open Imp”。来读取阻抗文件 SKO130-Imp.FRQ。你可以点击文件名来预览，并选择正确的曲线（见图 2）。

注意那条深颜色的水平线 – 目标声压等级。这是我们希望系统能优化到的目标。可以用鼠标左键上下拖拽这条线，或者将左上角的数值(90.3 dB)改为其它值。我们可以选择低音曲线在 200Hz 以上的比较平坦的那一段的声压级数值。因为这非常接近我们期望系统达到的最大的声压级。我们将在后面章节讨论偏轴声压级曲线。

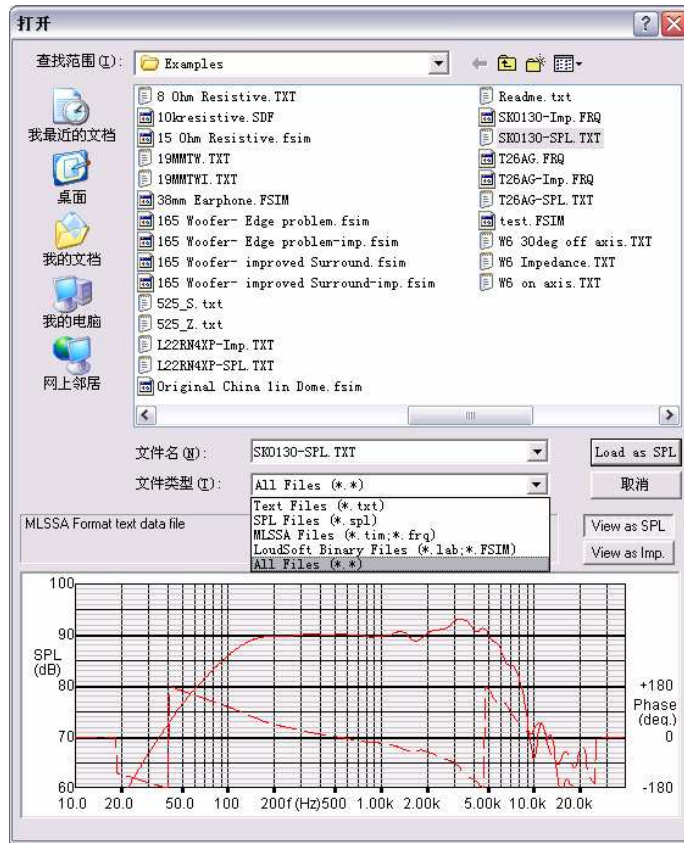


图 2. 文件预览

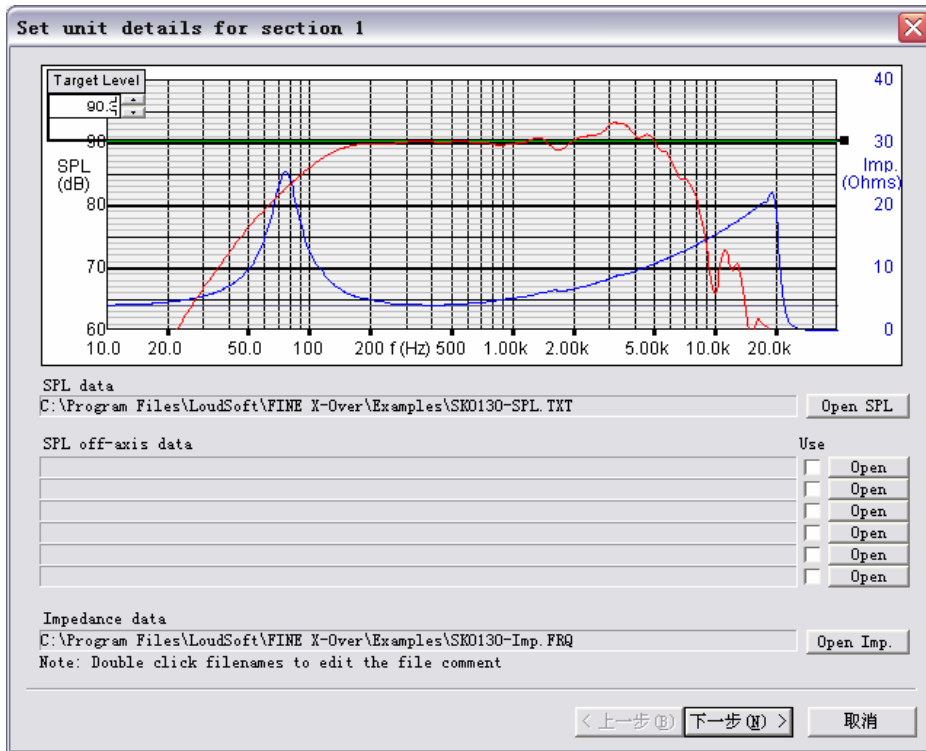


图 3. 文件读取

点“下一步”，用同样的方法读取高音。这一次我们尝试用直接测得的 T26AG.frq 文件，而不用输出为 TXT 格式的文件。让我们保留 90.3dB 的目标声压等级，并将它也用于高音。

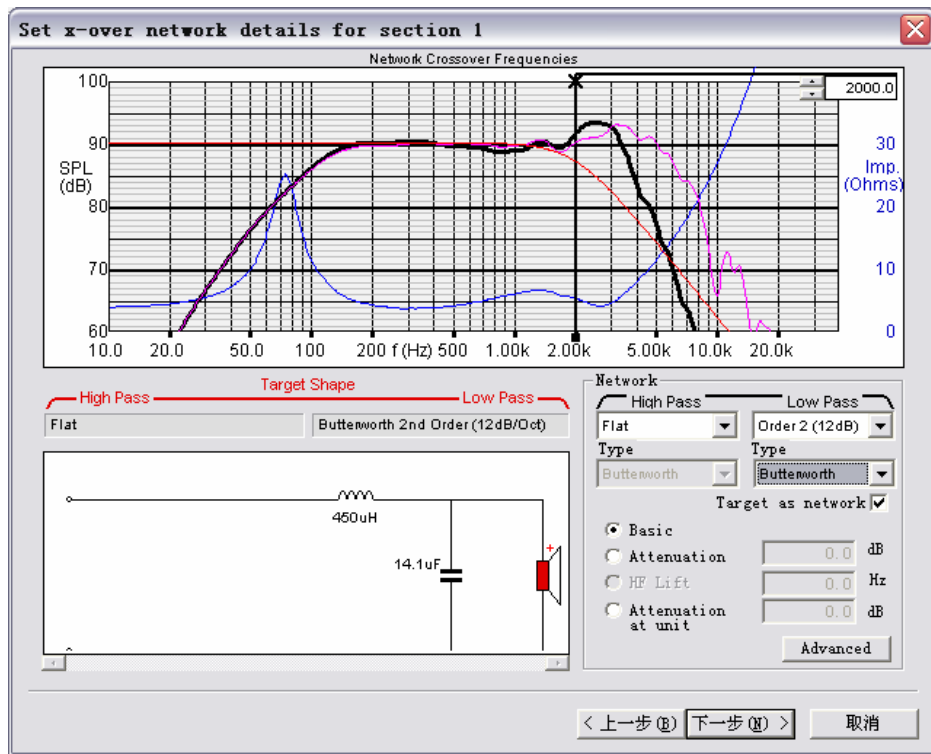


图 4. 目标声压级曲线

现在是时候选择分音器的类型和目标频率响应了。图 4 显示了第一个音路 - 低音。我们可以选择 Butterworth (Linkwitz-Riley, Chebyshev 和 Bessel 都可选) 类型。从 1<sup>st</sup> Order (6dB/Oct)(第一阶(6 分贝/音程))到 4<sup>th</sup> Order(24dB/Oct)都可以选择. 黑色的垂直线显示了我们选择的分音器的频率, 而且我们在 2000Hz 选择了 2<sup>nd</sup> order (12dB/Oct) Butterworth. 你可以用鼠标左键拖拽黑色的垂直线, 同时注意已滤波后之响应曲线的改变。

下一个窗口是第一个音路(低音)的优化, . 我们要在保持最小阻抗为 4 ohms -20%=3.2 ohms (依照 通用的 IEC 60268-5 标准)的情况下, 将分音器组件优化, 以达到 2<sup>nd</sup> order 低通响应曲线(红色——)。可以看到电感(L)和电容(C)上面已经做了表示优化的红色箭头。

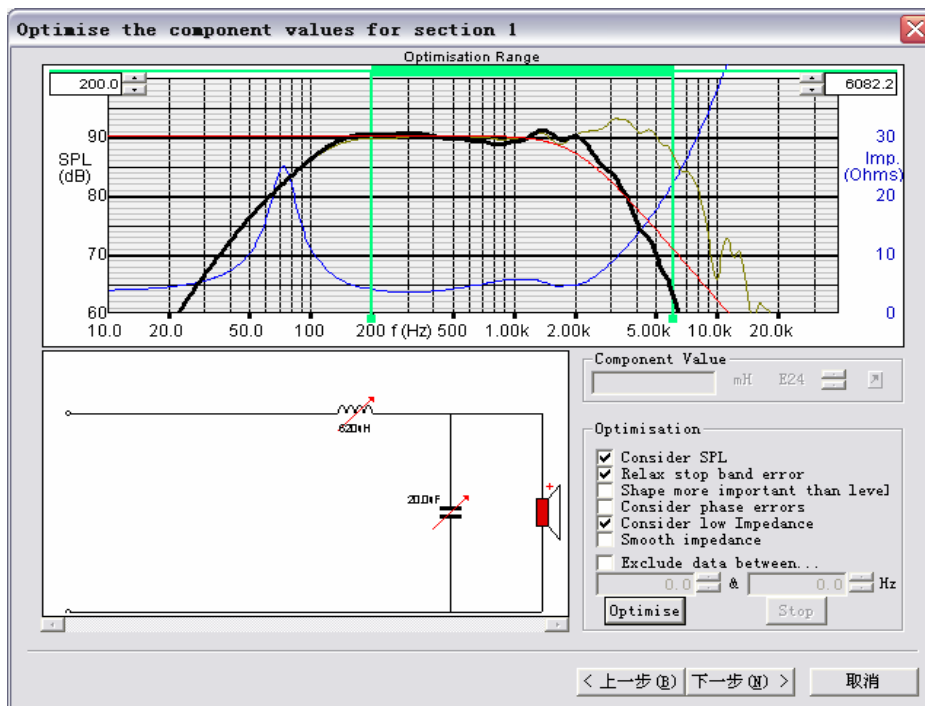


图 5. 优化第一音路

两条绿色直线之间是优化范围，它也可以象前面的黑线那样被鼠标拖拽。我们选择从 200Hz 开始，因为低音的频率响应曲线升到 200Hz 以后的一段几乎是平的（如果此处选择过低的频率，会导致优化结果变差）。优化范围的上限预设是分音器频率的两倍(=4000 Hz)。为了包括峰值，我们将优化范围的上限增加到 6000 Hz。

右边的 Optimisation 栏是关于优化的设置。“Consider SPL”(考虑 SPL)和“Relax stop band error”(忽略衰减频带的错误)为预设选中状态。我们选择了“Shape more important than level”(形状比声压级更重要)，因为这可以让系统在更高声压级选择好的频率响应曲线。更进一步的“Consider low impedance”(考虑低阻抗)是在设置的频率响应曲线时，避免太低的阻抗。

现在我们点“Optimise”，几秒钟以后就可以看到优化的频率响应曲线。

下一个窗口(图 6)显示了第二音路的目标频率响应曲线，也标示出了已经选好的分音器频率(2000Hz)。因为高音的灵敏度高于我们的期望值，所以我们选择 3dB 的衰减(加电阻)。

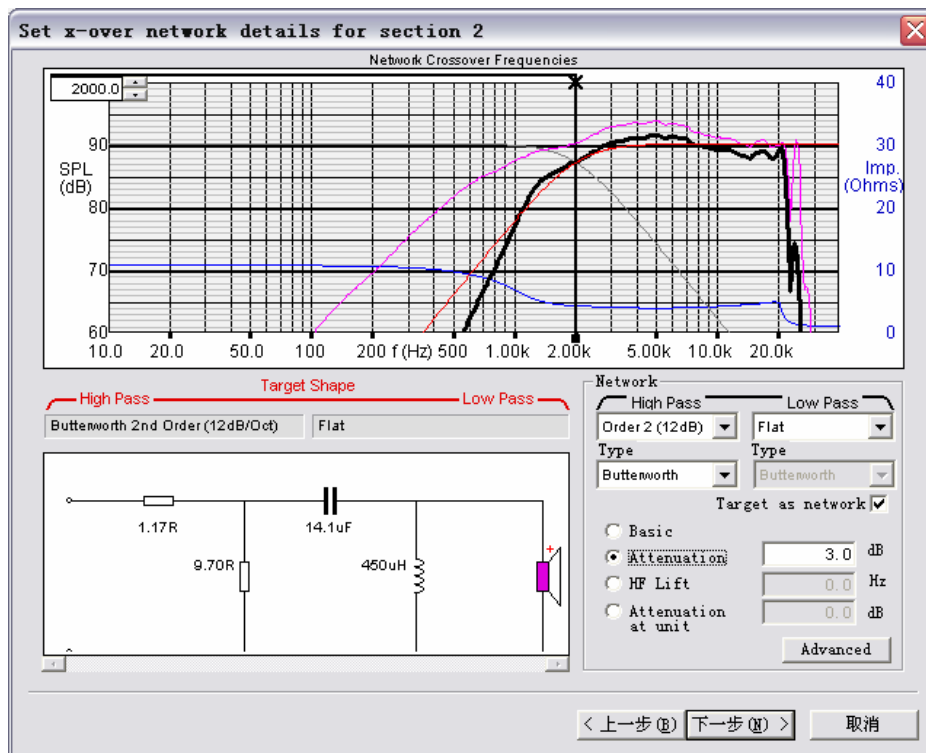


图 6. 目标高音声压级

图 7 显示了高频(高音)优化范围是从 1000 到几乎 20KHz，因为我们想包括频率响应曲线的峰值，又不想超过阻抗曲线的限度(20KHz)，所以选择这个范围。

如果你想保留任何一个组件作为固定值，只需要双击该组件，那么它上面的红箭头(=变数)就消失了。

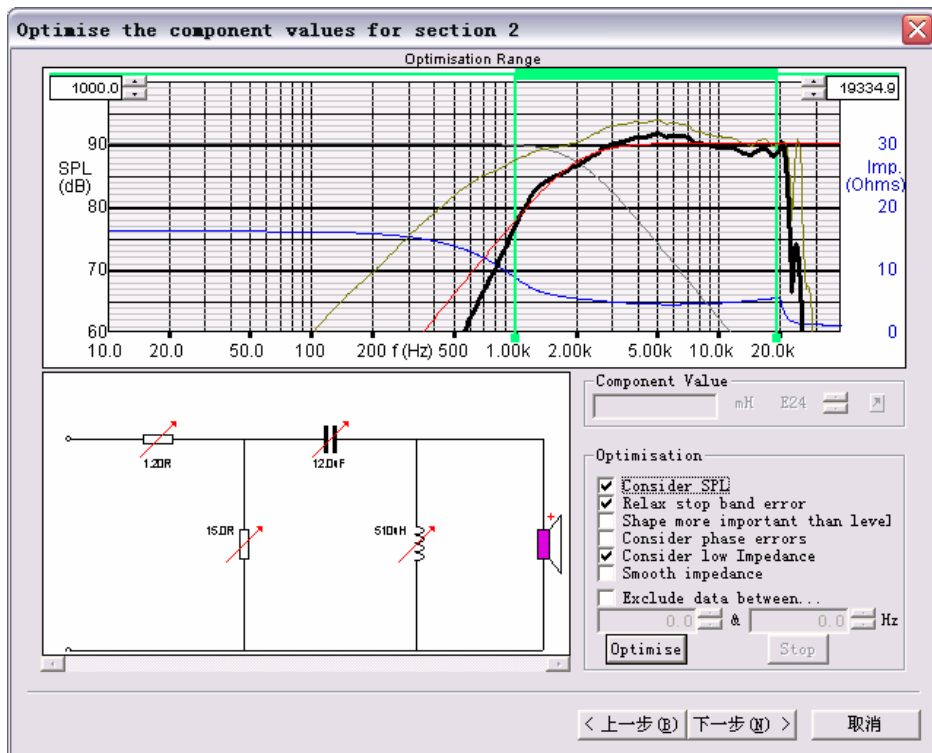


图 7. 优化高音音路

点“Optimise”以后，我们看到优化了的高频/高音响应曲线已经非常接近目标值了 FINE X-over 助手到这里就完成了它的使命。

主窗口中，优化的整体频率响应曲线已经非常平了。但是，我们还可以用 Optimisation-System Optimisation 来获得一个更好的曲线。

优化范围设置为整体频率响应曲线的平坦的一段。但是，我们这次不选择“Shape more important than level”(形状比声压级更重要)，因为我们对完全符合目标声压级的频率响应曲线感兴趣。

最终优化的曲线(图 8)是在 150-20kHz， $\pm 1.0$  dB 范围内平坦的。最小阻抗也在 20-20kHz 范围内大于最低限度(3.2 ohms)。那个 1 兆欧姆的阻抗显然没有什么效果。我们可以把它拿掉。



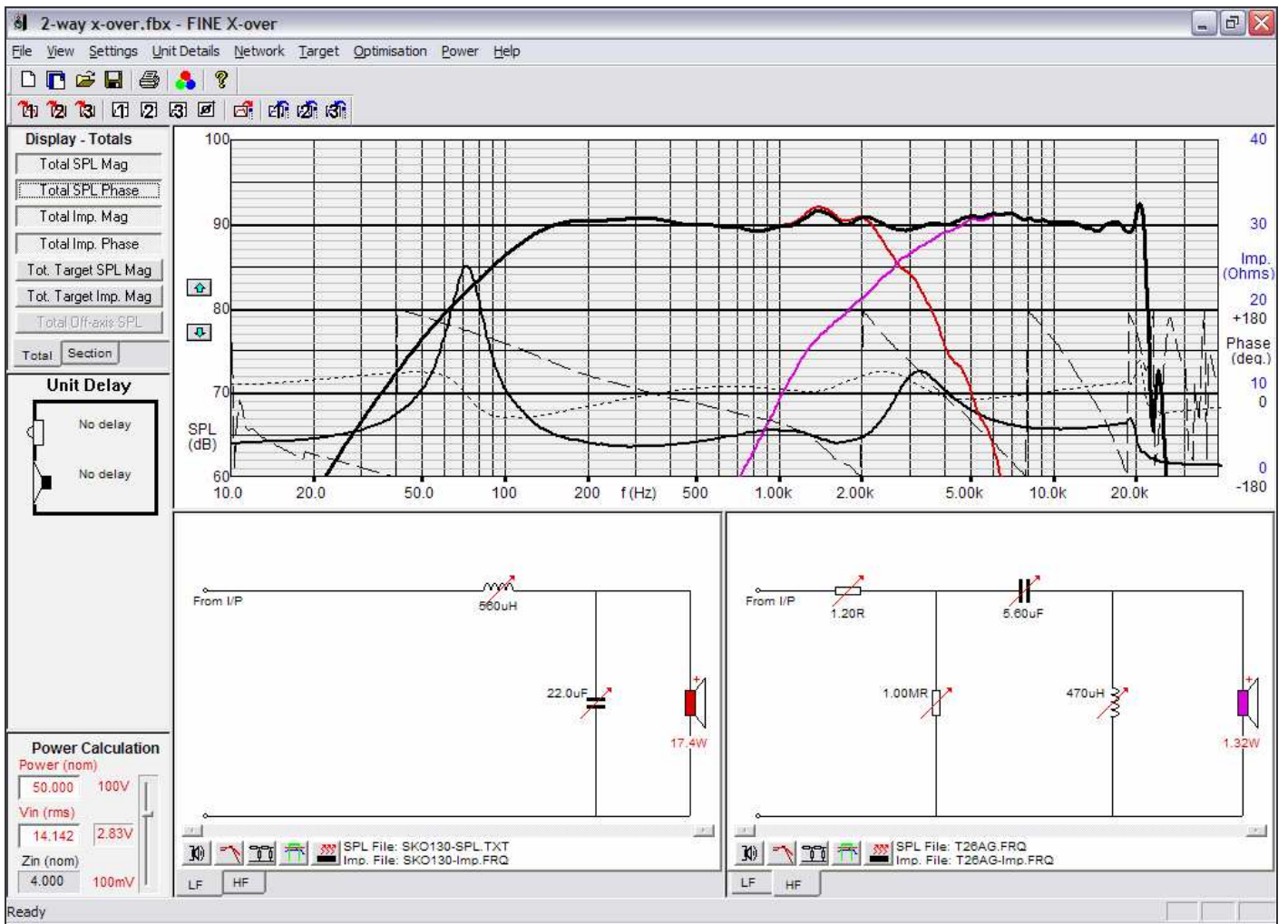


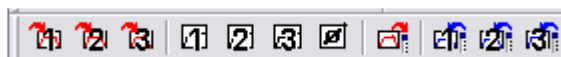
图 8. 最终优化曲线（包括声学 and 电子的相位）

低音(低频)和高音(高频)的功率用红色字体标在喇叭符号的下方，分别是 17.4W 和 1.30W，输入 50W RMS (IEC 60268-1: 模拟音乐)。(用左边的滑动条来增加输入功率)。

注意: 在组件上点鼠标左键，会弹出一个编辑窗口，在窗口中可以输入组件值。也可以通过转动鼠标中键，或者用菜单中的箭头，或者通过键盘来改变组件的值(标准 E24/E12...)。

点“Total SPL Phase”(整体频率响应曲线的相位)和“Total Imp Phase”(整体阻抗曲线的相位)来看声学的和电子的相位响应曲线，见图 8。声学的相位(-----)非常线性，而电子的相位(.....)一直到 20kHz 都有 +/- 45 度角变动。它们看上去都不错。

可以用下列按钮将当前的整体频响曲线存在内存中或者存为文件。





# 输入 FINECone 的 FSIM 格式文件

新版本的 FINE 系列软件可以互相传递 FSIM 格式的文件。也就是说，我们可以完全不用制造实际模型，而是通过软件操作就可以完成模拟并解决问题。

图 9 显示的模拟曲线，低音音路单体是一个 FINECone 模拟的 165mm 低音。我们可以看到，在 1300Hz 有一个波谷。在设计分音器时，要避免这个波谷，有一定难度。当然也是因为高音在不是太大功率状态 ( $>2.26W$ ) 下，无法延伸到太低的频率。

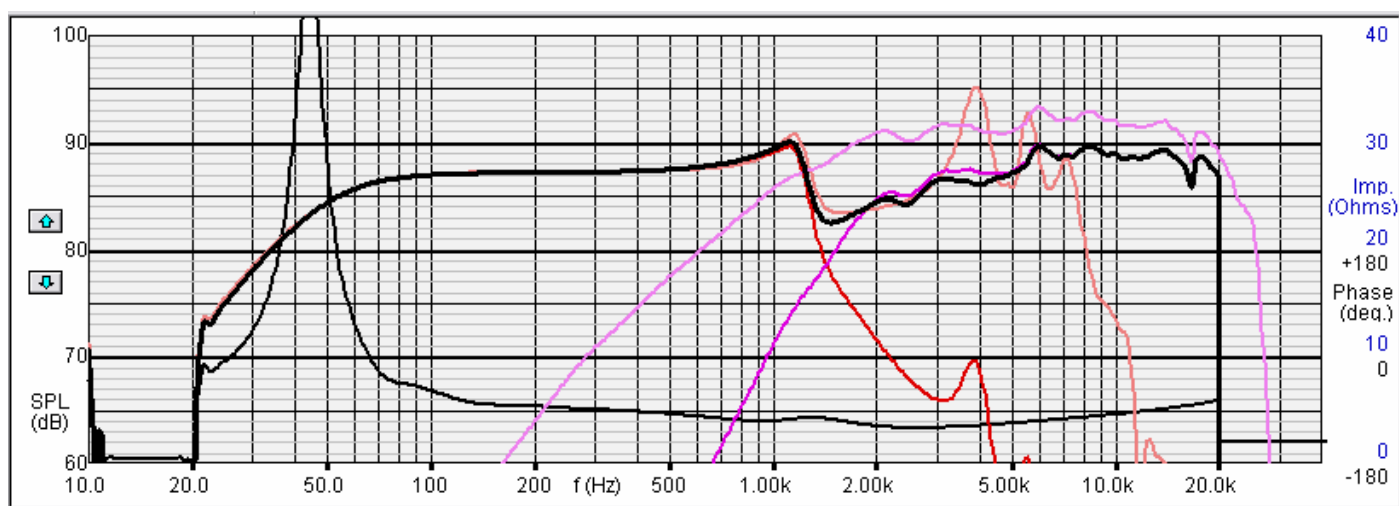


图 9. FINECone 165mm 低音频响曲线 (FSIM 格式) 输入到 FINE X-over

我们在 FINECone 中，将这个不好的低音改善后，再将曲线输入到 FINE X-over，见图 10。现在，就可以通过改善分音器来得到很好的曲线了。

另外，我们通过增加一个  $72.1\mu F//2.2\text{ ohms}$  电路，模拟了音箱面板对曲线的影响。音箱的前面板会在特定频率(1004 Hz，见图 10 中组件的值)降低音箱曲线的声压级。(灰色频响曲线是未加面板的模拟曲线)

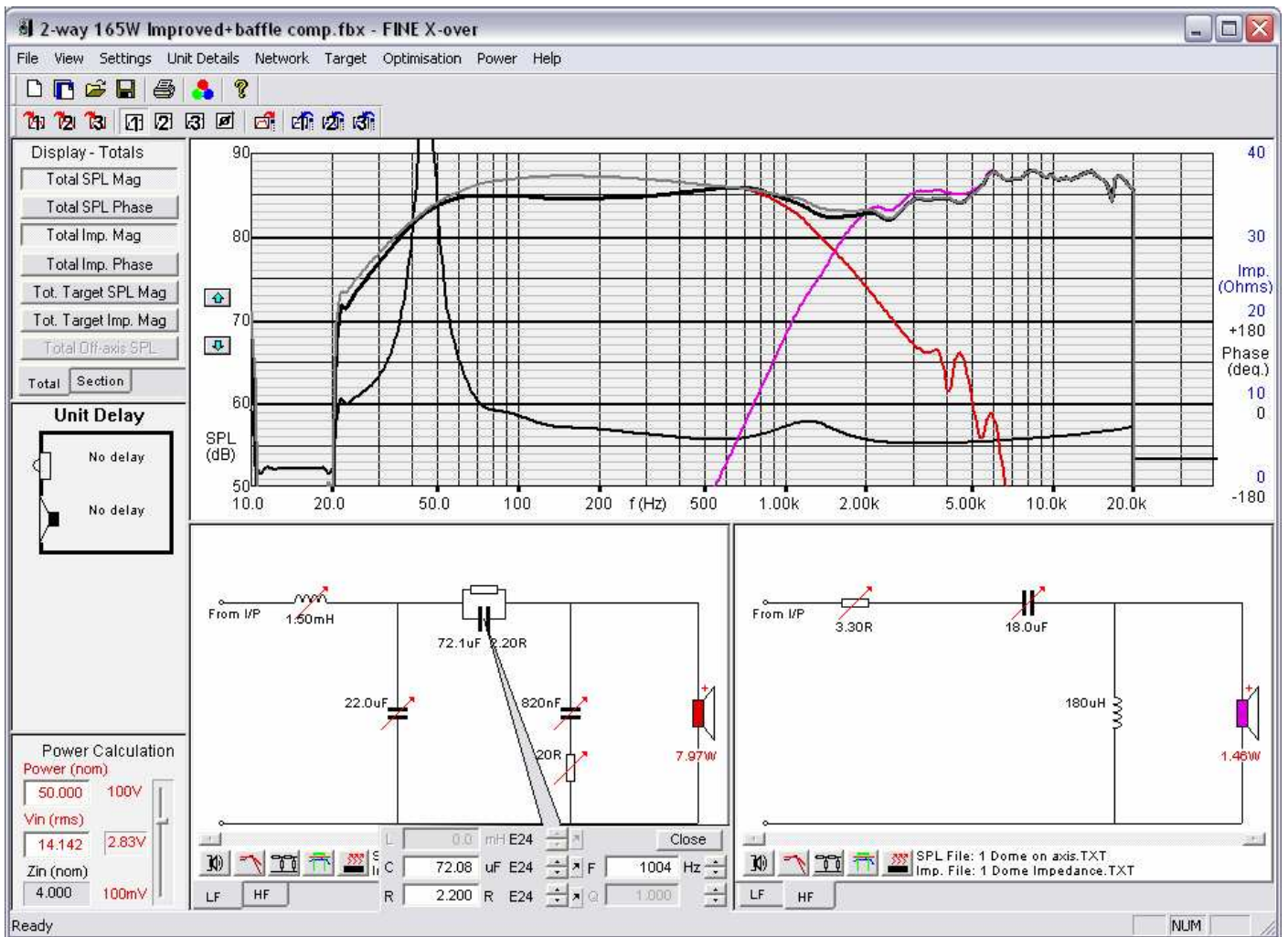


图 10. FINECone 改善曲线再输入 + 音箱面板模拟

# 偏轴频响曲线的设置

当我们设计高品质音箱系统的时候，不仅要考虑正轴频响曲线，而且要考虑偏轴频响曲线。在 FINE X-over 里可以实现之。见图 9 中的 2 音路音箱系统。

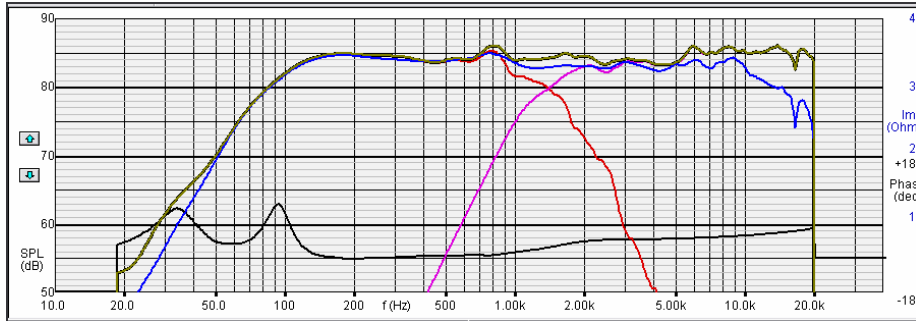


图 11. 用 FINE X-over 计算出的正轴和偏轴频响曲线

用计算正轴曲线的设置，同样可以计算偏轴曲线（蓝色）。注意，蓝色曲线中同样可见 6KHz 的峰值。

近年来的声学研究表明，控制偏轴频响曲线并使其平滑对于音箱系统来讲很重要。因此，要在保持正轴曲线的同时，优化偏轴曲线。在下例中，我们将介绍如何实现这种设计。

在输入曲线时（图 11），我们使用一个小技巧。输入偏轴曲线在“SPL data file”栏，输入正轴曲线在“SPL off-axis data file”栏。当然，我们可以输入多达 6 个不同的偏轴曲线。

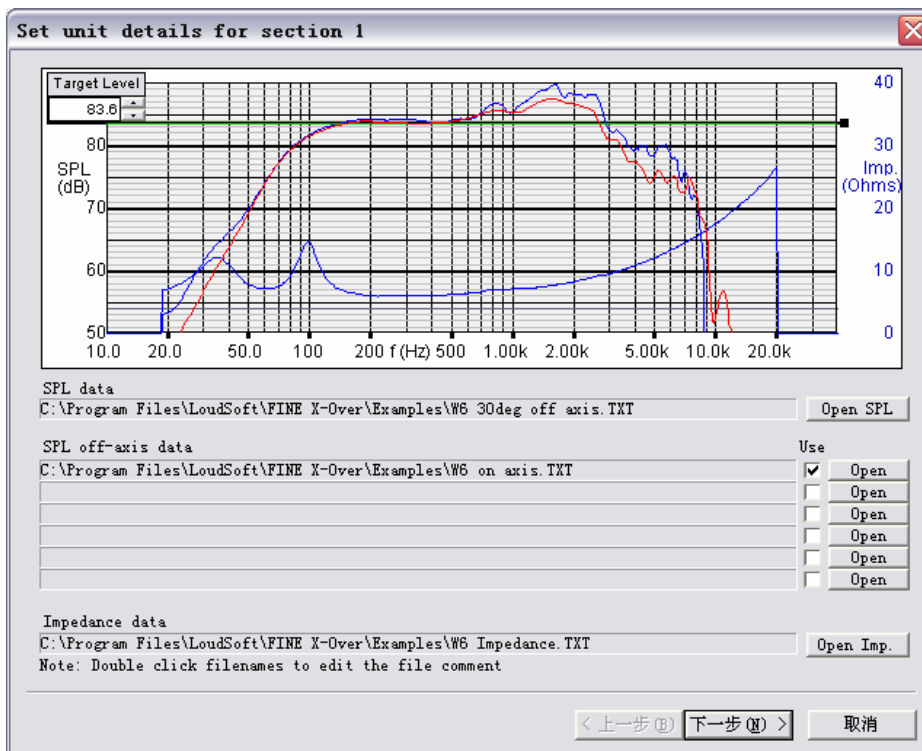


图 12. 正轴和偏轴频响曲线输入

但是，偏轴频响曲线不应该象正轴曲线那样平。它应该在高频有下降的趋势。

在主菜单栏点选“Target”，然后在下拉菜单中选“System Target”。我们设置目标为从 1000Hz 开始按照-0.5dB/oct 变化，见图 13。

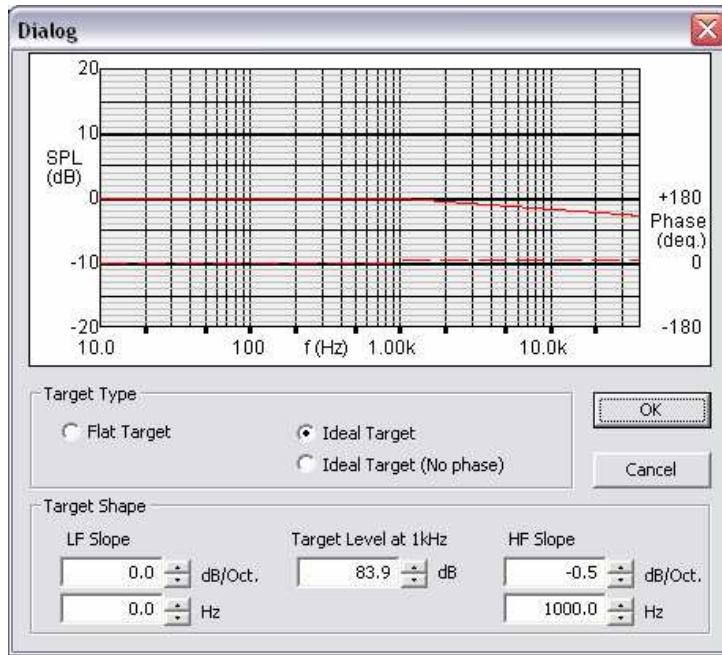


图 13. 倾斜的目标声压级设置

现在我们将按照倾斜的目标声压级优化偏轴频响曲线，见图 14。于是，偏轴频响曲线达到了我们的要求。

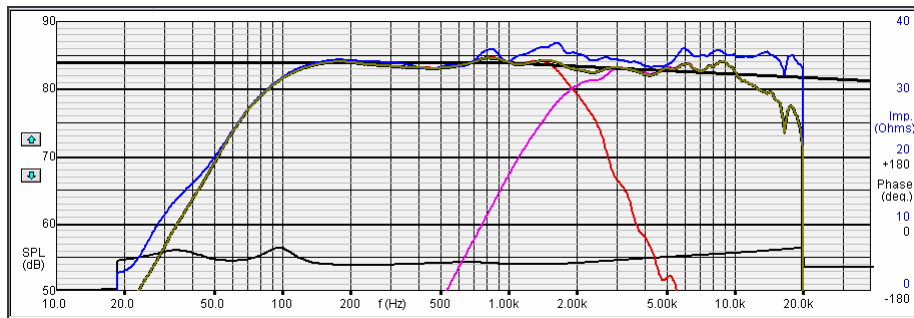


图 14. 按照倾斜的目标声压级优化

# 三音路分音器

(点“File”-“New”)在下一个例子中，我们将设计一个高级的三音路分音器。用先前的两个喇叭作为中音和高音，并且再加一个新的喇叭作为低音。新的低音有 8 欧姆的阻抗，但先前的两个是 4 和 6 欧姆。因此，我们确定 4 欧姆的系统公称阻抗。为了保护功放，我们打算设计我们的系统最小阻抗为 3.2 欧姆。

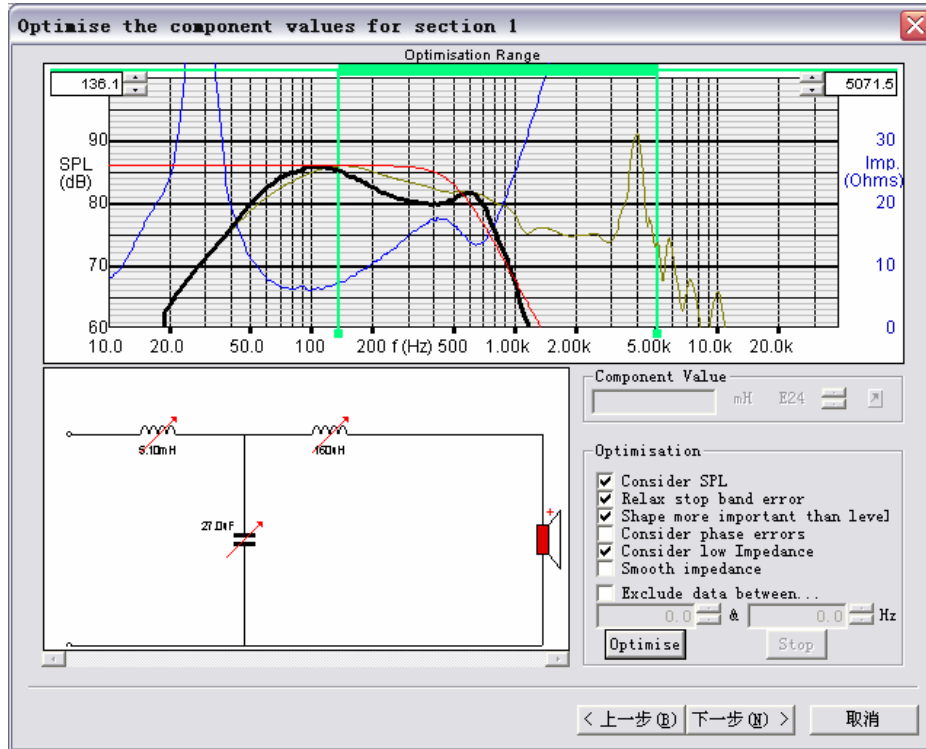


图 15. 没有补偿的低音频率响应曲线

图 15 显示了低音(SEAS L22RN4X/P)的频率响应曲线(—)。它有一个向下的倾斜，而且在 4kHz 有一个大的峰值。考虑到这个低音较低的灵敏度，我们将目标频率响应曲线定为 86 dB，分音器频率为 500 Hz。

图 15 也显示了按照 3rd order (18dB/oct) Butterworth 优化的频率响应曲线 (注意，我们设定的优化范围比较大，是因为要包括那个峰值)。但是，这个优化的频率响应曲线离我们的目标(—)还很远，还需要进一步改善。点“上一步”。我们可以选择一个 4th order (24dB/oct)或者特殊的分音器，但是我们还要查一下导致这个不良频率响应曲线的原因。

这个 SEAS L22RN4X/P 低音有一个很长的音圈，而且在 500Hz 以上有很高的阻抗。这就是导致我们的三音路分音器的组件不是很有效的原因。幸运的是我们还有另一个选项，也就是用一个电容和一个电阻来补偿阻抗的升高。见图 16。

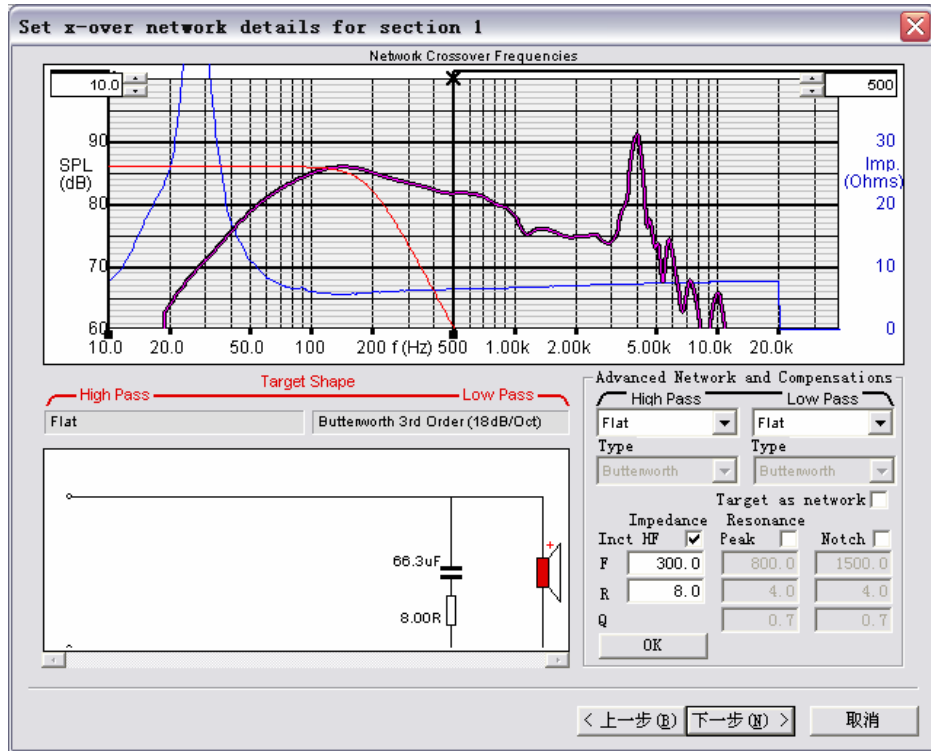


图 16. 低音(阻抗)补偿

为了看到没有分音器的情况下的喇叭本身的阻抗曲线，我们在“Target shape”中选择“flat”(等效于没有分音器)，并且点“Advanced”按钮。现在我们看到三种组件：Impedance at HF(在高频的阻抗)，Resonance peak(共振峰值) and Notch (filter)(消峰滤波器)，点选它们可以看到左侧组件图的相应改变。第一个选项的作用是限制电阻在高频升得过高；第二个将会降低低音的共振频率  $F_s$  处的声压级；最后一个可调的消峰滤波器。

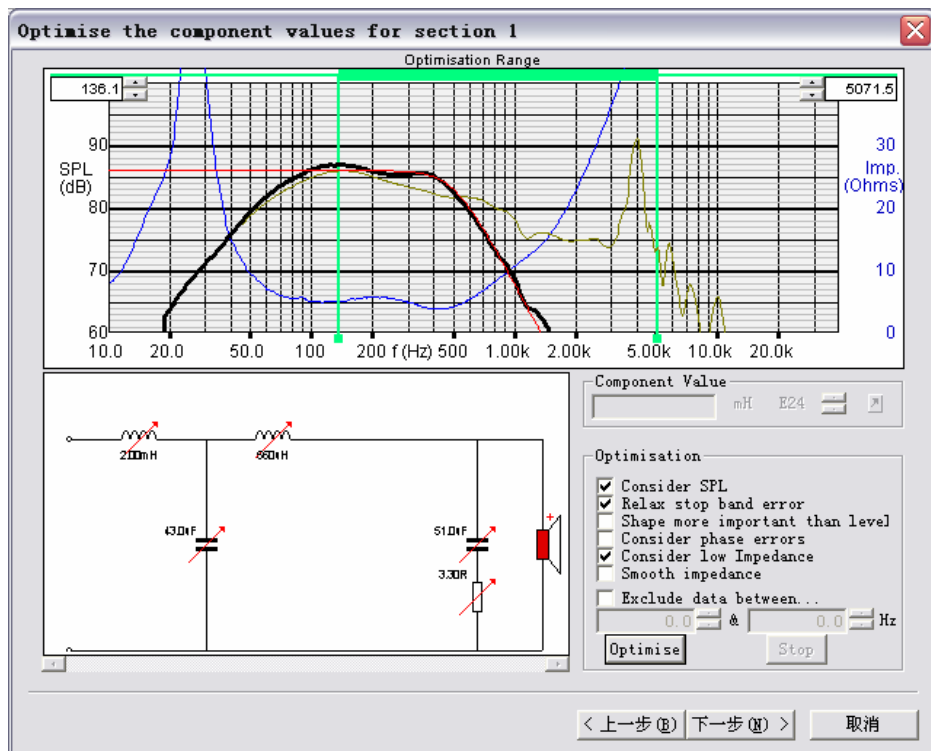


图 17. 补偿后的优化的低音

图 7 是新优化的低音频率响应曲线，现在它已经非常接近期望值了。同时，阻抗曲线也大于最低阻抗限度。点“下一步”。我们现在想用 SK0130 作为中音。因此，我们需要选择两个分音器频率来构成波通滤波器，见图 18。低端分音器频率定为 500Hz，高端大于 4000Hz（为 4592.8Hz）。



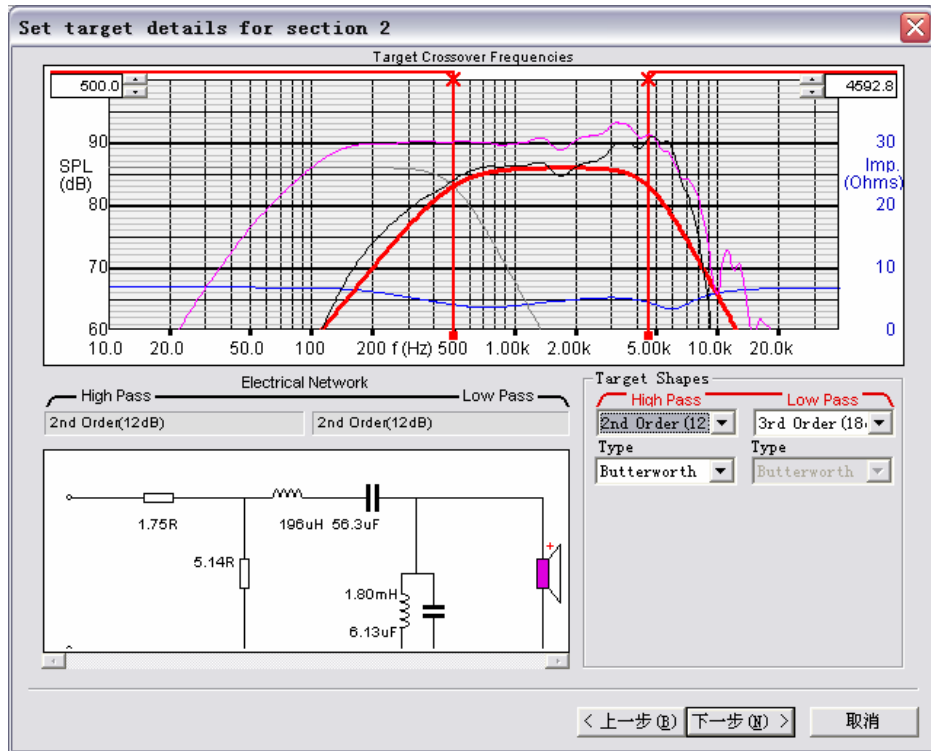


图 18. 目标中音设置

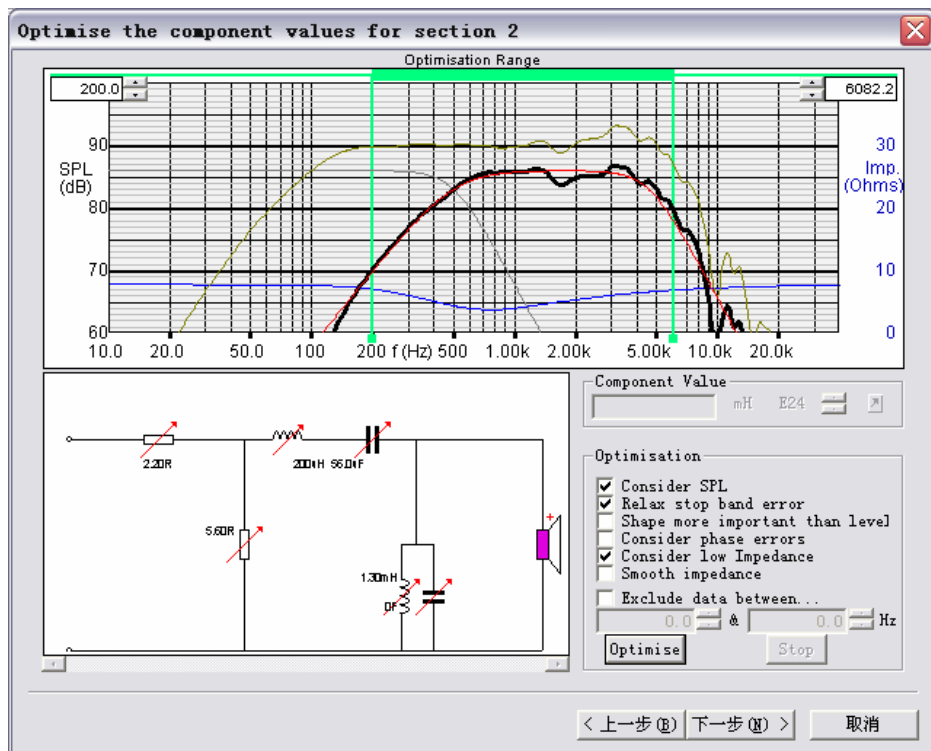


图 19. 优化的中音波通

这次，因为中音的灵敏度高于我们的期望值，所以我们需要设置“Attenuation”(衰减)选项为 5dB。这样频率响应曲线就可以接近我们的期望值(86dB)。当然，这也不是非常重要。因为优化程序会找到最佳可能的设置(包括衰减器组件)。



由于我们没有选“Target as Network”（电路决定目标），所以可以在 2nd order network（2 阶电路组件）上设置目标为 3rd order target（三阶目标）。点“下一步”。将中音优化范围上限设置到 6000Hz，我们得到优化的中音波通，见图 19。我们用预设的优化设置，但是未选定“Shape more important than level”。这是为了得到最符合目标声压级的频率响应曲线。

高音音路的设置，跟前面我们设计那个两音路分音器的程序是几乎一样的。这里，我们需要设置“3rd order target”，“Attenuation”为 6dB，并且不选“Shape more important than level”。优化的高音音路见图 20。

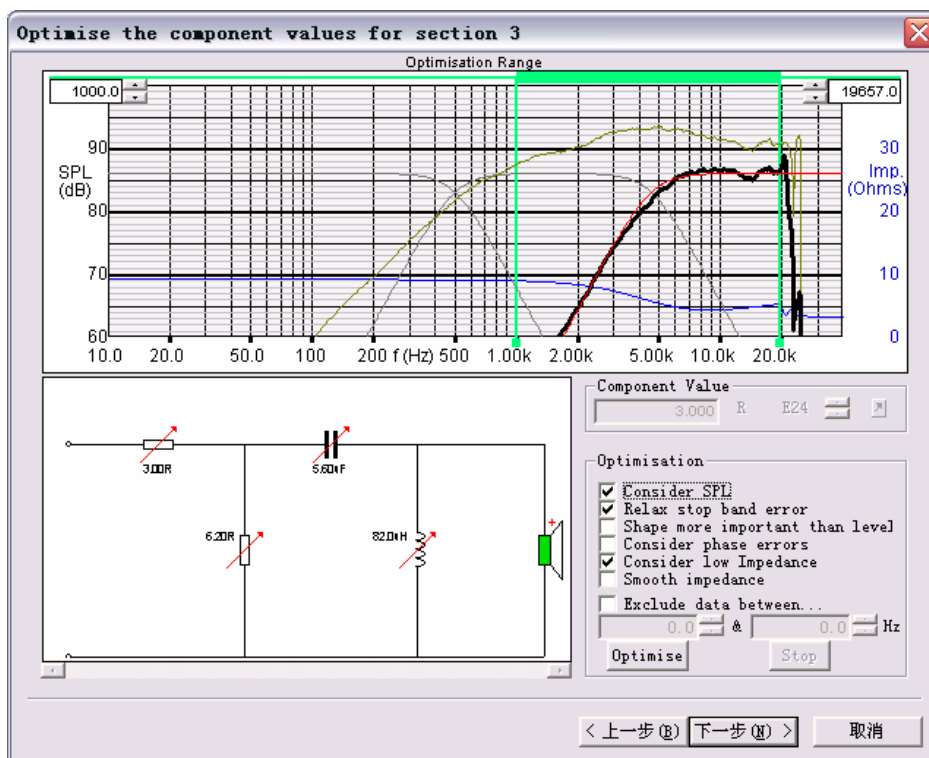


图 20. 优化的高音音路

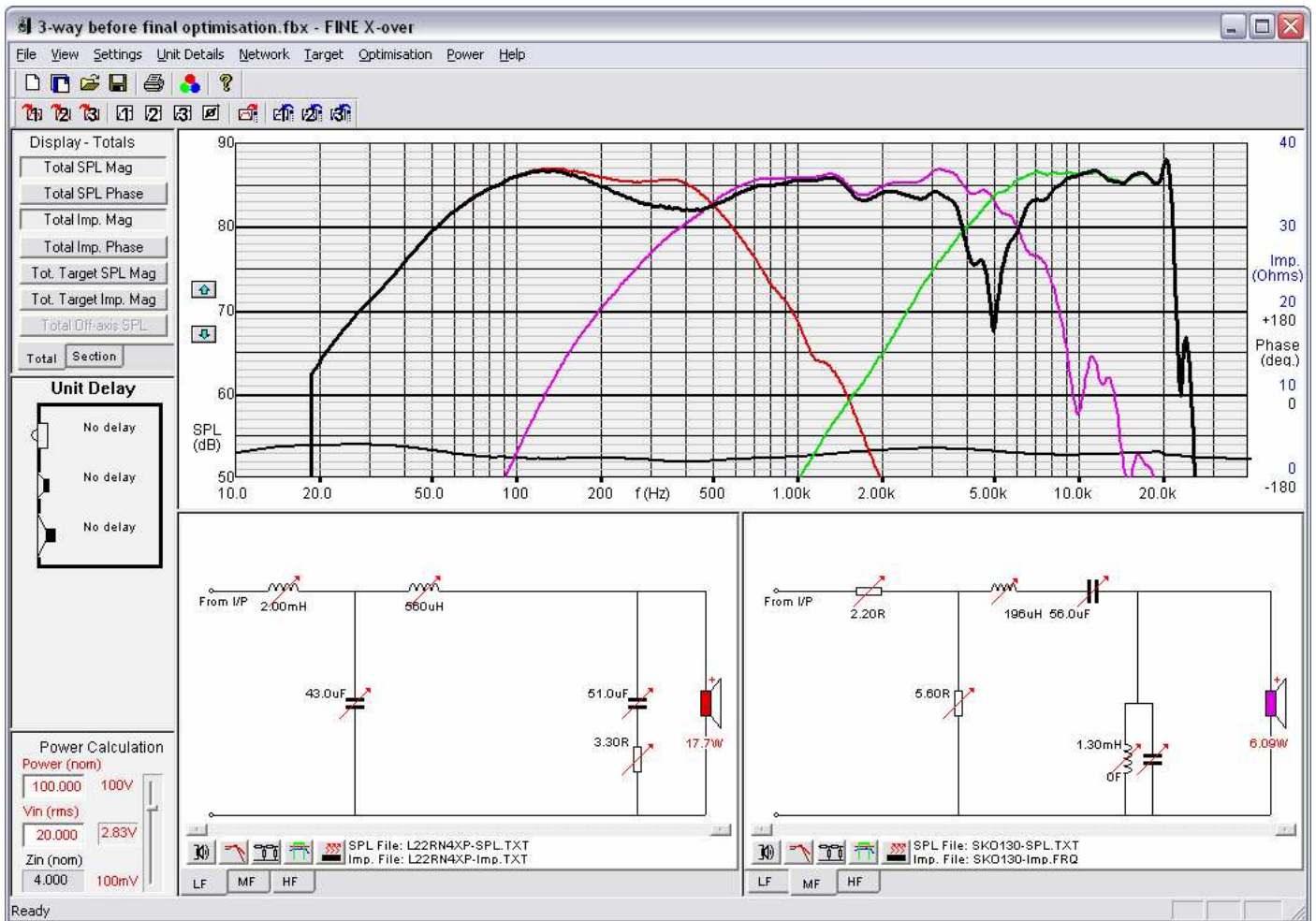


图 21. 有相位问题的整体频率响应曲线

现在我们完成了 FINE X-over 助手，是时候看一下整体频率响应曲线了。见图 21。

出乎意料，这个整体频率响应曲线并不很好。但是，当我们查看单体的频率响应曲线时，我们看到低音和中音，中音和高音都配合得不错。两组单体没有配合起来的原因，在于相位不匹配。

有两种办法可以改变喇叭单体的声学相位：A) 改变+和-端子；B) 移动喇叭单体位置（延迟）。首先，我们先试一下 A，然后再用 B。

### A) 中音反向

我们可以很容易的改变中音的电子相位(+ 和 - 端子)。点中音图示，会跳出图 22 的窗口，选中“Phase Invert”就可以了。

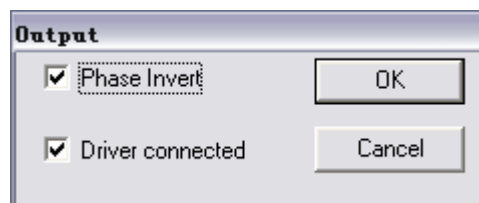


图 22. 喇叭单体相位设置

现在，频率响应曲线在 400Hz 和 5000Hz 的波谷消失了，但还是不够平。我们现在可以优化整个频率响应曲线。但是因为有了太多的组件，这对优化程序来说变量太多了，不利于计算。

因此，我们需要引导优化程序少优化几个组件。规则是“多不如少”。在第一个低音音路，我们将阻抗补偿电路固定(双击电容和电阻，去掉红色箭头)，这样就可以在优化的时候只改变两个电感和一个电容了。

中音音路的组件有些是用来滤掉低频。这包括 16 uF(本来值为 0)的并联的电容。点击组件，转动鼠标中键滑轮，将各组件值微调为标准值(这里设定为 E24 范围)。同时可以观察曲线的变化(见图 23)。中音是最难设计的，因此我们把中音的所有组件都留给优化程序。

为了保持现在已经很好的高音频率响应曲线，我们固定高音音路的电容。最后，点“Optimisation”-“System Optimisation”，从 150Hz 到 15 kHz（用鼠标托动两条绿色线），选中“Consider Low Impedance”(因为我们需要在得到最平的频率响应曲线的同时，保证阻抗大于最小值 3.2 欧姆)。点“Optimise”。

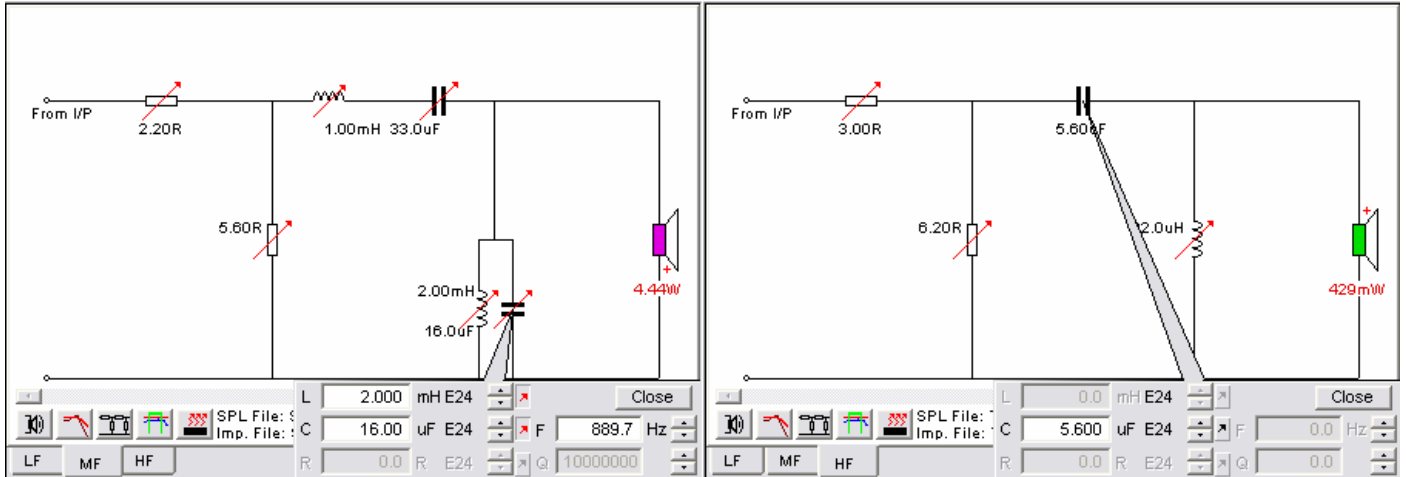


图 23. 最终优化前的组件设置

优化后频率响应曲线非常平，在 90 Hz 到 12 kHz 达到了 +/- 1dB。而且，阻抗也在要求的最小阻抗 3.2 Ohms (10-20000 Hz)之上。

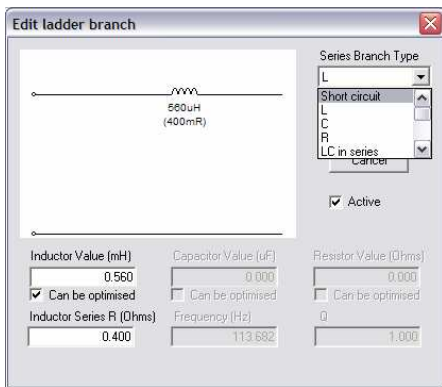


图 24. 组件增删窗口

现在我们可以去掉一些不重要的组件，以简化分音器。第一音路（低音）的电感只有 0.56 mH，去掉它应该影响不大。用鼠标右键点击该电感，会出现图 24。我们可以在这里增删组件。

我们在“Series Branch Type”栏中选 short-circuit。这对于整体曲线的影响小于 1dB。同样，我们把 2 和 3 音路（中音，高音）的平行电阻去掉。

有趣的是，我们开始时用在低音音路的是三阶滤波器，但是优化程序发现第三个组件根本没有用到。所以二阶滤波器也就足够了。

到现在为止，我们只是假设电感是理想的，也就是没有阻抗(RL)。现在我们在第一个(低音)音路的第一个电感上加上 0.4 ohms 的阻抗。鼠标右击这个电感(2.0mH)。图 24 显示了电感的组件编辑窗口。“Inductor Series R”栏，输入 0.4 欧姆。右上角的“series Branch Type”也显示了用不同方式插入多达 3 个组件的可能组合。也包括 “Short circuit”短路电路和“Open circuit”开路电路，这可以被用来移除组件。所有上述改变之后，再运行一次“Optimisation”- “System Optimisation”。结果见图 25。

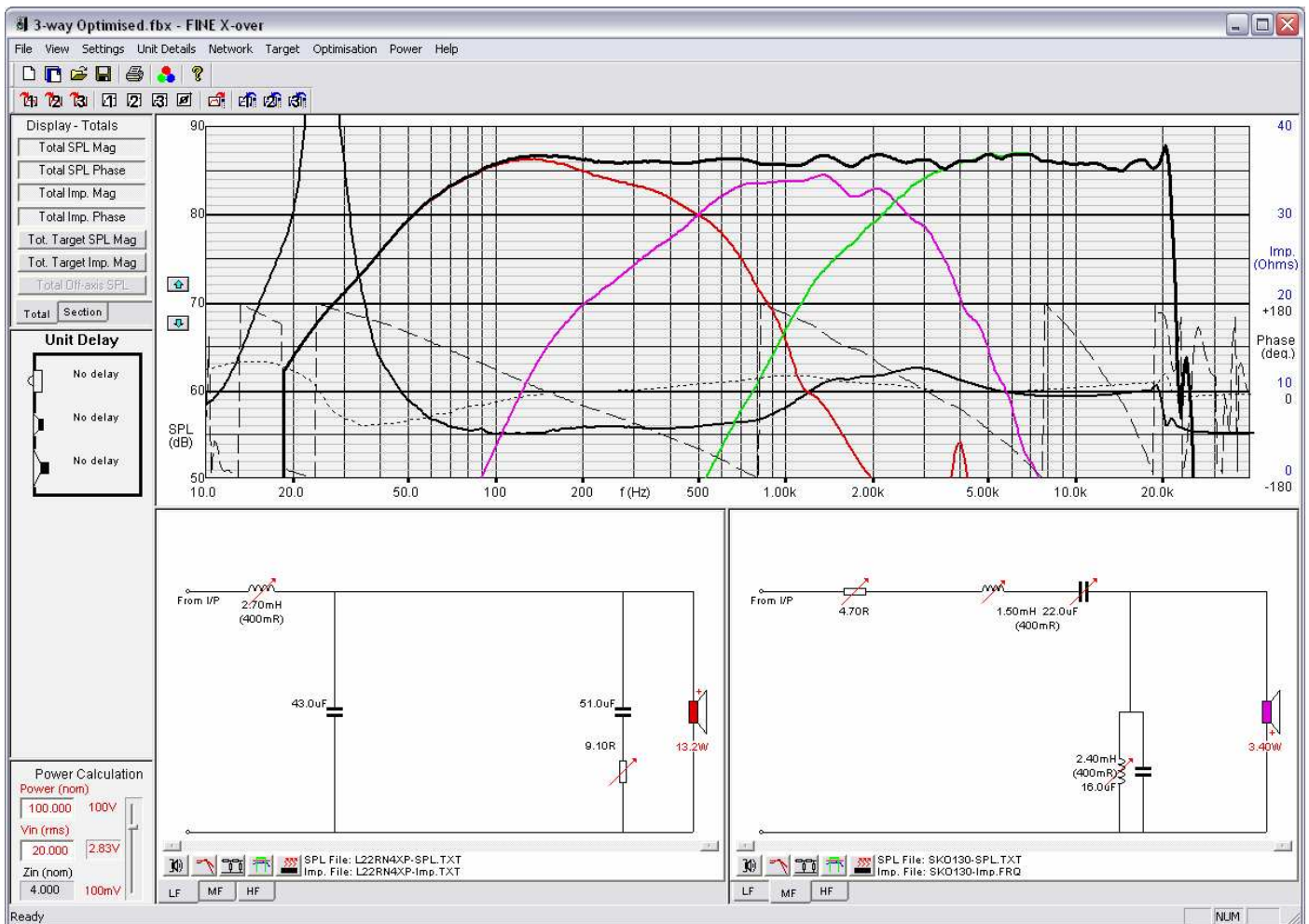


图 25. 最终优化的 3 音路分音器

## B) 中音和高音的延迟设置

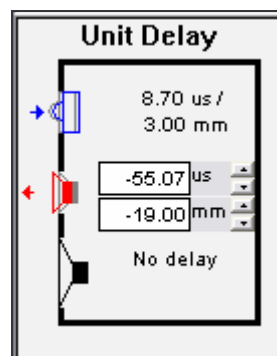


图 26. 喇叭单体延迟

如果不改变中音的+和-端子，我们也可以改变中音的位置，来达到改变相位的效果。见图 26。用鼠标点喇叭单体，并转动鼠标中键，我们可以改变喇叭相对于面板的横向位置。

可以通过观察喇叭单体的相位曲线，来找到最佳喇叭位置。所有喇叭调整后的频响曲线见图 27（包括电子相位）。该曲线的确被改善了，而且获得了更好的中音区段。

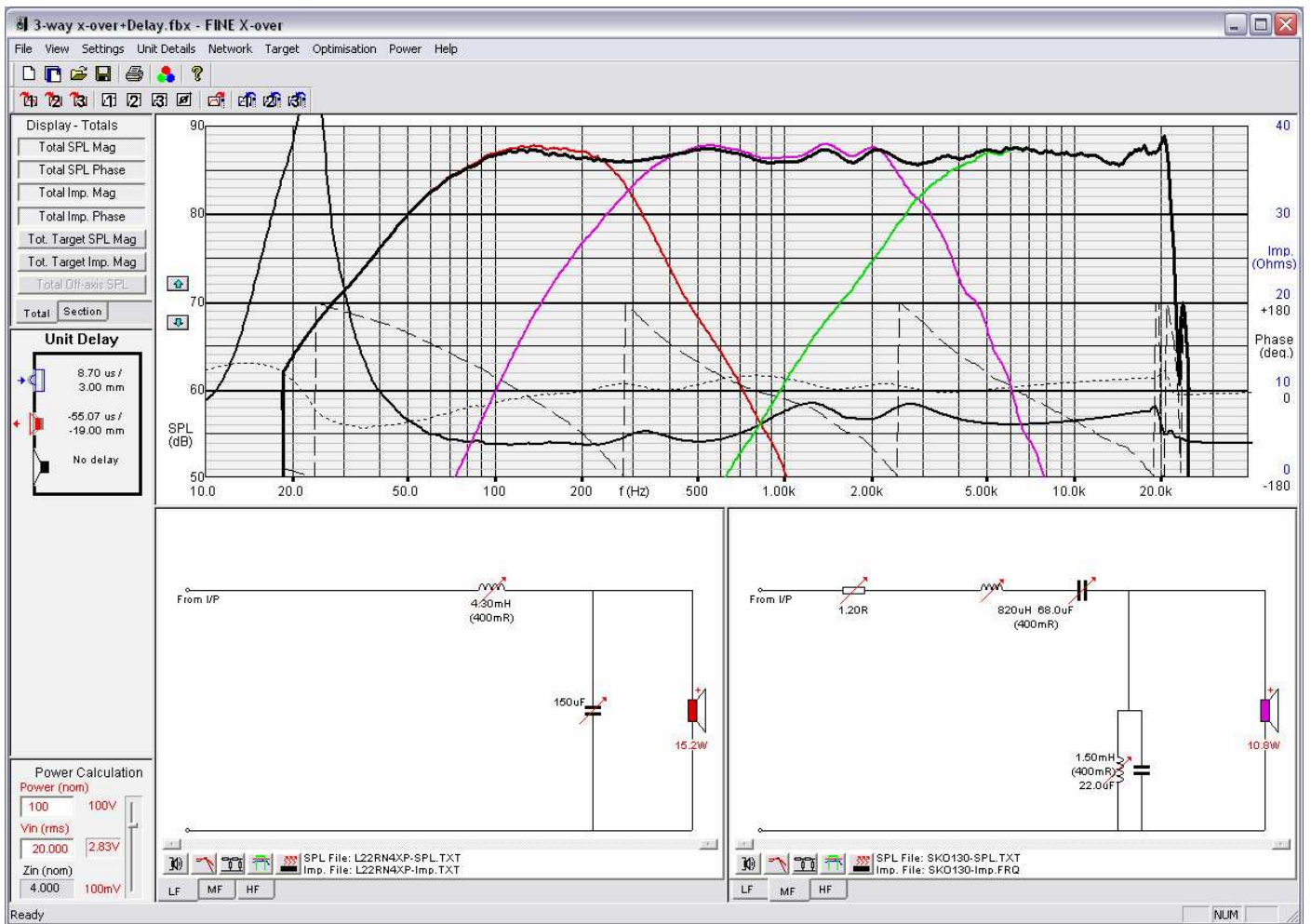


图 27. 中音和高音相位延迟后的 3 音路分音器



## 2.5 音路分音器

在设计多个低音的音箱的时候，工程师们总希望所有低音一起工作的同时，有一个低音延伸到中音或高音。

下面的例子就是这样，我们叫它 2.5 音路分音器设计我们用 L22RN4XP 低音作为第一音路单体。第二个低音 SKO130 是从第一个低音的端子接出来的。鼠标左键单击组件图的空白处，会弹出一个窗口如图 28。可以选择“From LF”。

频响曲线显示，两个低音在低频一起工作得很好，而且第二个低音（紫色）延伸到了高音。

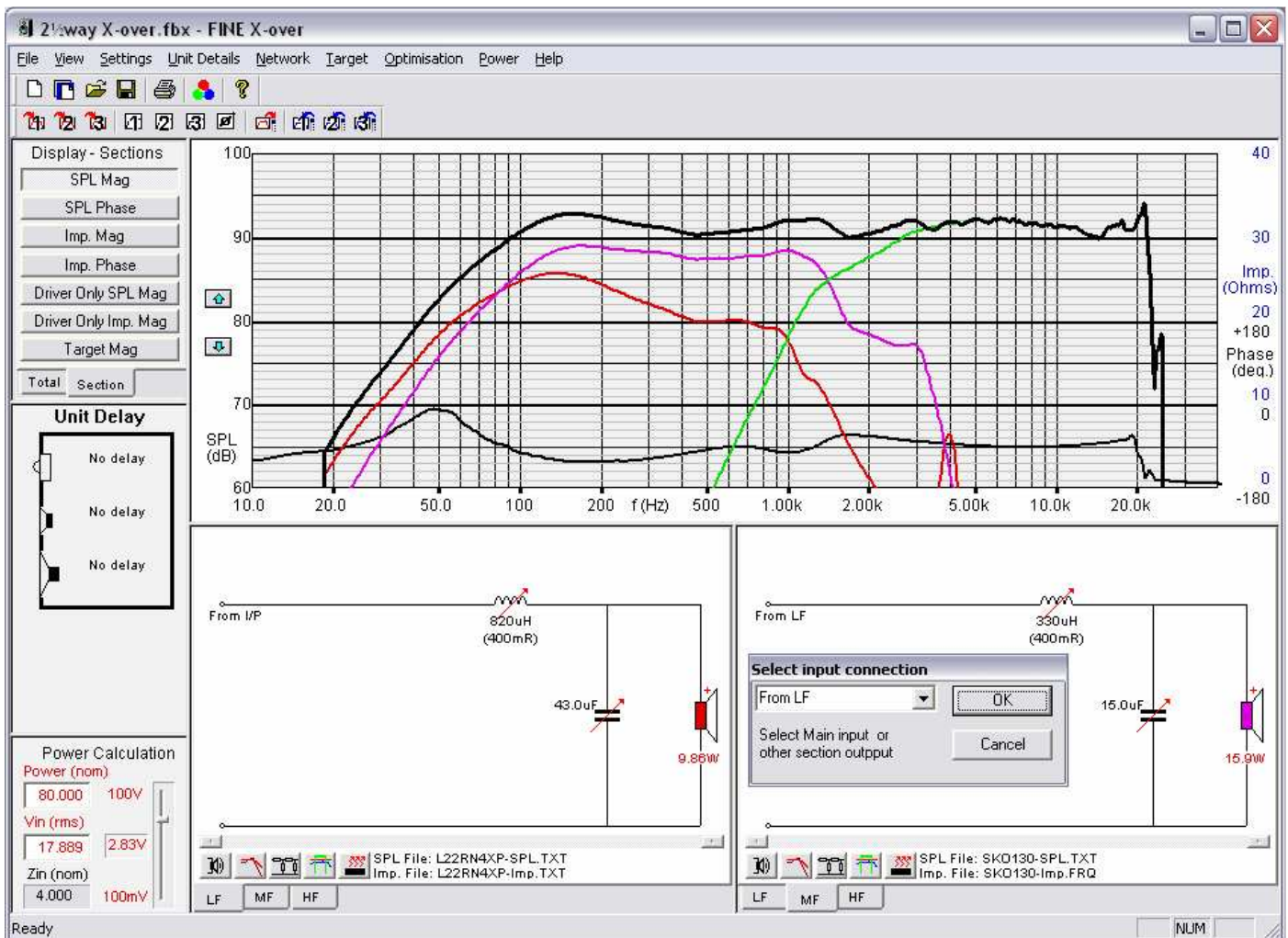



图 28. 2.5 音路分音器 (分流的低音)

# 喇叭单体和分音器组件中的功率

最后，让我们检查组件和分音器各音路的喇叭单体的功率。点按钮，来显示第一个音路的功率(图 29):

这里计算出了组件和喇叭实际的功率。输入是 100W (RMS)，公称阻抗 4 ohms，IEC 60268-1 功率频谱（用来模拟“一般”音乐）。

到喇叭的功率只有 6.38W，这看起来小了些。但是在多数频谱情况下，喇叭的阻抗高于系统公称阻抗（4 ohms）。分音器频率是 500 Hz，功率由于 IEC 60268-1 频谱而减少。

注意：电感的功率是 662mW，这是由于 0.4 ohms 的阻抗( RL)。补偿电阻的功率是 7.78W。（补偿电路电阻的功率可以达到非常大，因此这个功率值非常重要!）。

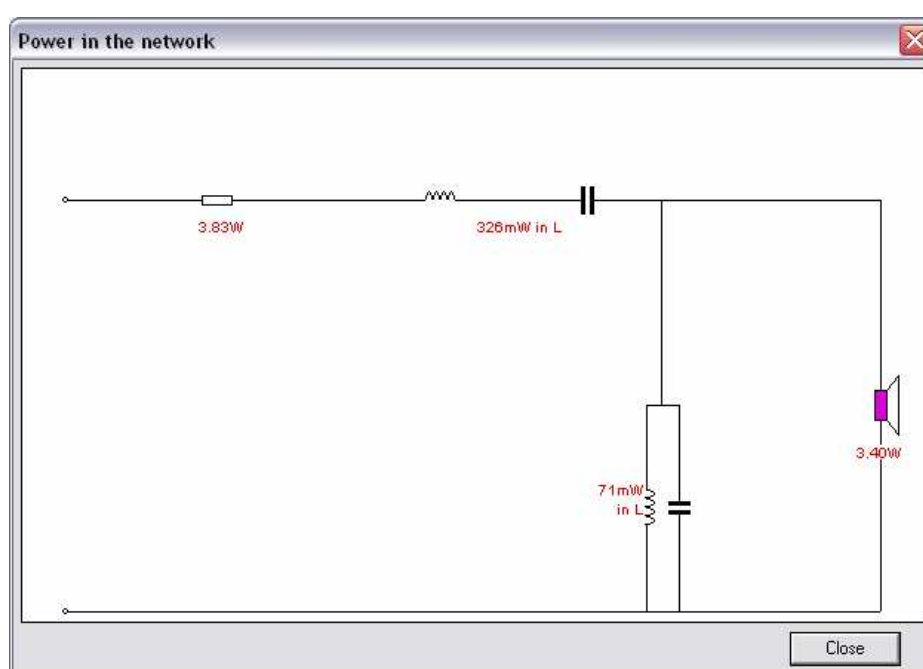
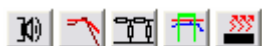


图 29. 三音路分音器—中音音路的实际功率



上面的一排按钮可以实现如下功能：

1. 喇叭单体频响曲线和阻抗曲线输入；
2. 目标声压级；
3. 分音器组件构成；
4. 优化。

最后，我们选“Settings”-“Component Adjustments” (图 30)。我们可以在这里设置我们想要的标准组件的范围。首先，用了 E24 范围，因为它很精确。选择 E12 会 5%不精确，这样就可以用比较便宜的组件。但是，为了得到最好的频响曲线，选择适当的设置也是必要的。



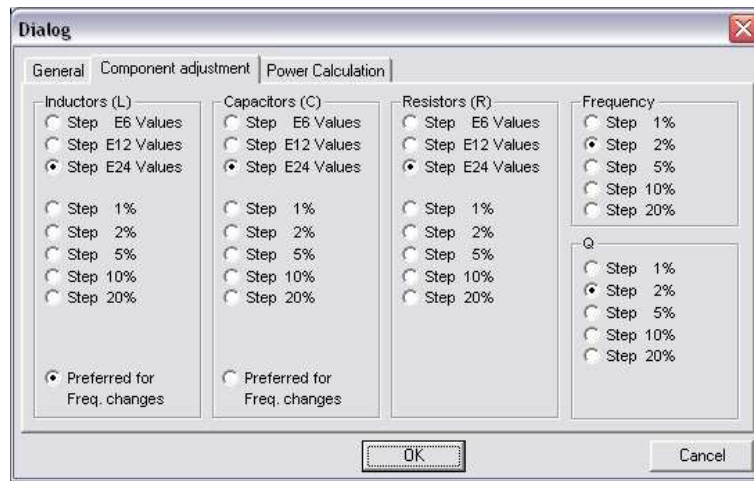


图 30. 组件调整设置

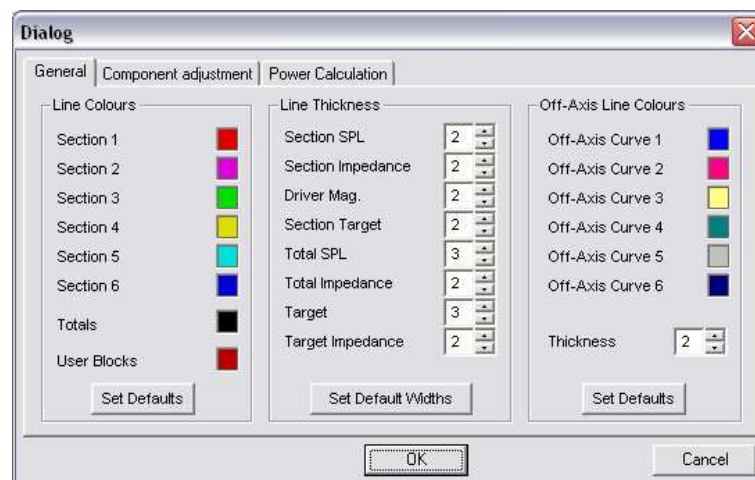


图 31. 颜色设置



Agern Alle 3 – 2970 Horsholm – Denmark  
Tel: (+45) 4582 6291 - Fax (+45) 4582 7242